第三章 月相、潮汐與日月食

3.1 月球之公轉與自轉

- **月球繞地球公轉的軌道近乎圓形**
  - **月球與地球的距離變化很小**
  - **月球在天空中的視大小約為半度**(0.5°)，**變化不大** (**圖** 3-1)。
- **恆星週期 (Sidereal period)：*相對於遙遠的恆星，月球環繞地球轉動一週所需的時間***
  - **27.3日**
  - **這是月球「真正」的公轉週期**
- **月球軌道平面與地球繞日軌道平面相交約** 5°
  - **對地面觀測者來說，月球經常在黃道** (ecliptic) **附近運動**
- **月球的自轉週期與恆星週期相同**
  - **地面觀測者永遠只能看見月球的同一面** (**圖** 3-2)

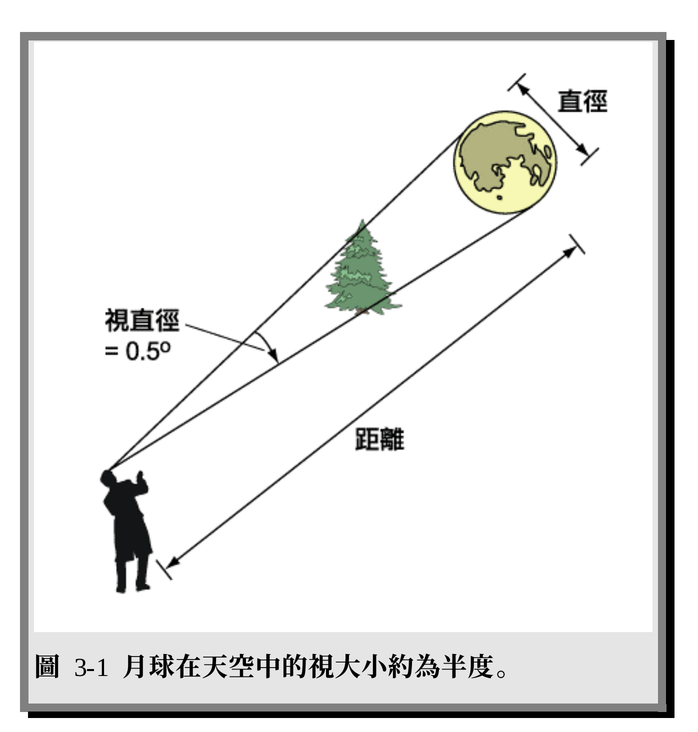


圖 3-1 月球在天空中的視大小約為半度。

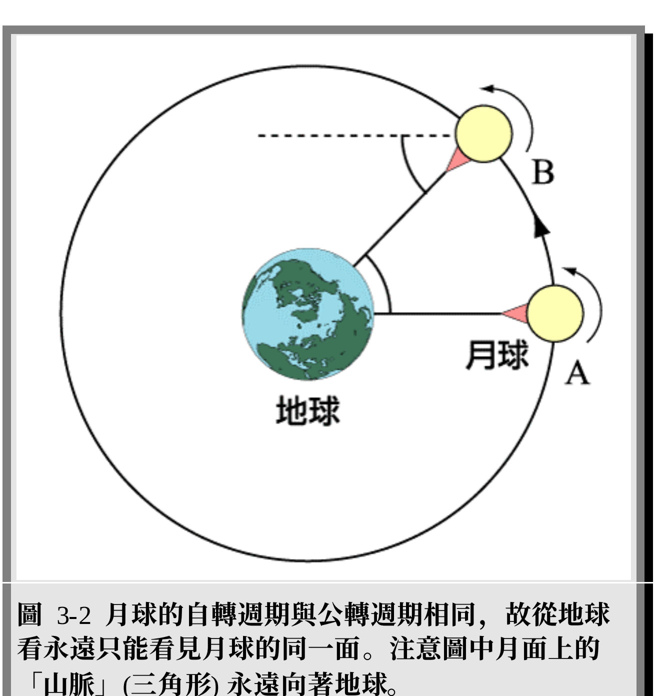


圖 3-2 月球的自轉週期與公轉週期相同，故從地球看永遠只能看見月球的同一面。注意圖中月面上的「山脈」(三角形) 永遠向著地球。

3.2 月相 (Lunar phase)

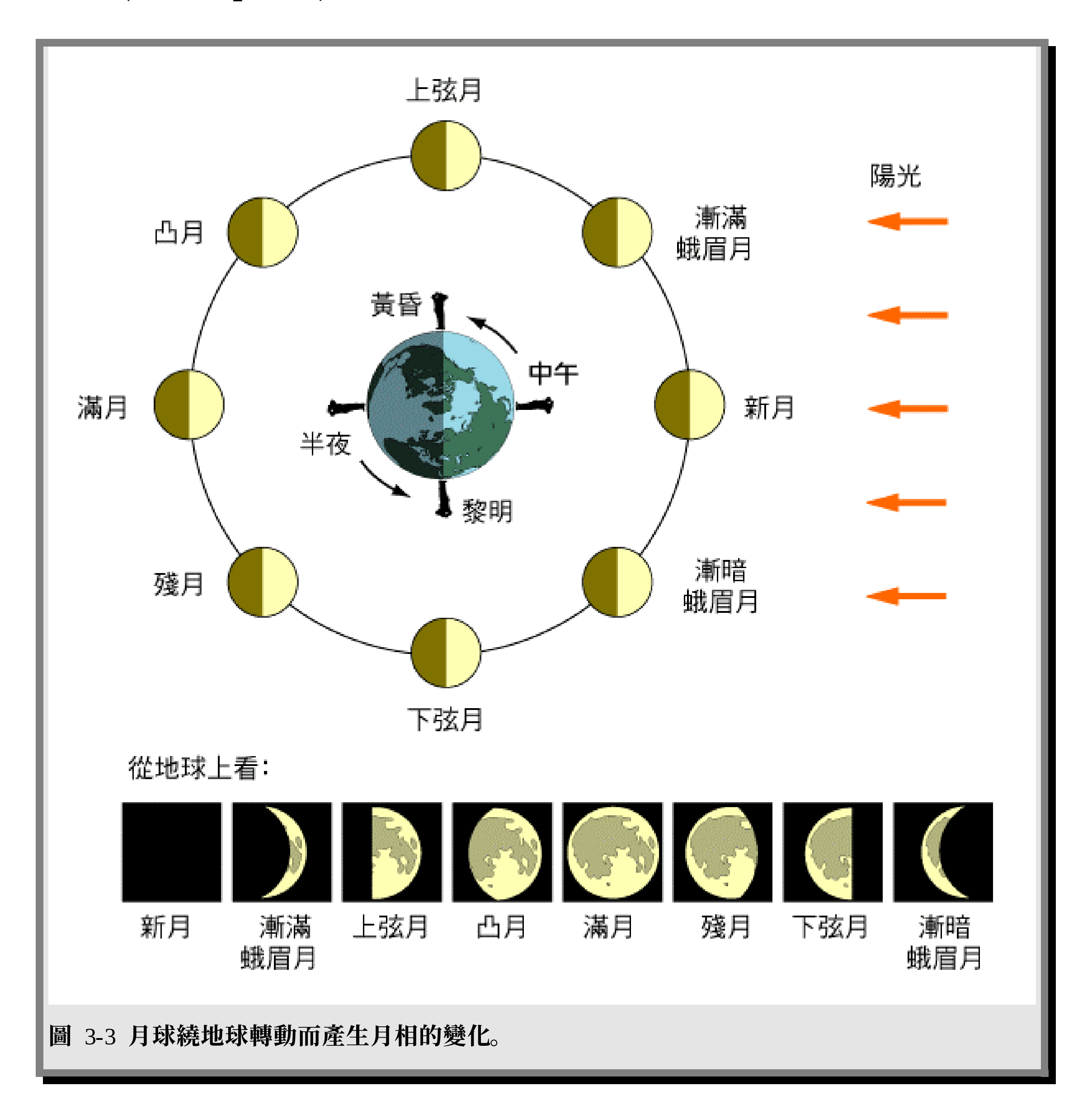


圖 3-3 月球繞地球轉動而產生月相的變化。

- **月相之循環：新月(朔月) → 漸滿蛾眉月 → 上弦月 → 凸月 → 滿月 → 殘月 → 下弦月 → 漸暗蛾眉月 → 新月** (圖 3-3)
  - **新月** (New Moon)**：月球在地球與太陽之間，故不能反射太陽光到地球，而夜間也看不見月球** (**農曆初一**)
  - **漸滿蛾眉月** (Waxing crescent)**：只能看見一小部份被太陽照亮的月面。黃昏時月球出現於西方地平線上，日落不久後沒落**
  - **上弦月** (First quarter)**：能看見一半被陽光照亮的月面。日落時位於空中最高的位置，子夜時沒於西方**
  - **凸月** (Waxing gibbous)**：能看見大部份被陽光照亮的月面。日落*前*不久於東方升起**

- 滿月 (Full Moon)：月球與太陽的方向相反。整個月面給陽光照亮。日落時於東方升起，日出時於西方沒落 (農曆十五)
- 殘月 (Waning gibbous)：月相與凸月相似（但被照亮的一面向東），於日落後不久後在東方升起
- 下弦月 (Third quarter)：月相與上弦月相似，但於子夜時在東方升起
- 漸暗蛾眉月 (Waning crescent)：月相與漸滿蛾眉月相似，日出*前*出現於東方地平線上

• 從月相可大概推斷月球東升和西沉的時間
  - 在月相圖中注意地球自轉的方向 (逆時針方向)，定下日出、中午、黃昏、和午夜四個位置 (圖 3-4)
  - 在觀測者所在的位置劃下地平線，注意地平線東方 (東升) 和西方 (西沉) 所指向的月相
  - 例 (圖 3-4)：上弦月時，月出於中午，於黃昏到達天空中最高的位置，沒於午夜

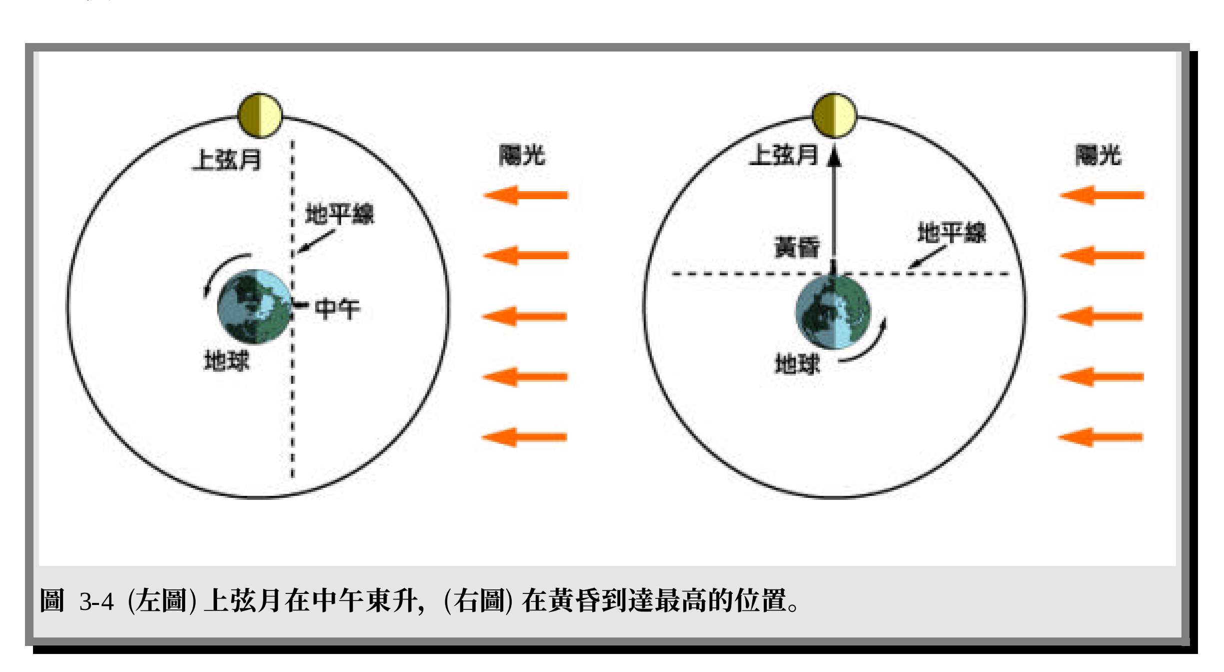


圖 3-4 (左圖) 上弦月在中午東升，(右圖) 在黃昏到達最高的位置。

- 朔望週期 (Synodic period)：即月相週期 (連續兩個新月相隔的時間)
  - 29.5 日
  - 月圓月缺的週期，因此農曆一個月是 29 或 30 日
- 當月球完成一恆星週期後 (即月球環繞地球公轉一週後)，地球亦繞太陽走了一段距離
  - 地球與太陽之相對方向改變了
  - 月球需要多走約兩日才能再次位於地球與太陽之間
  - 朔望週期比恆星週期長約兩天

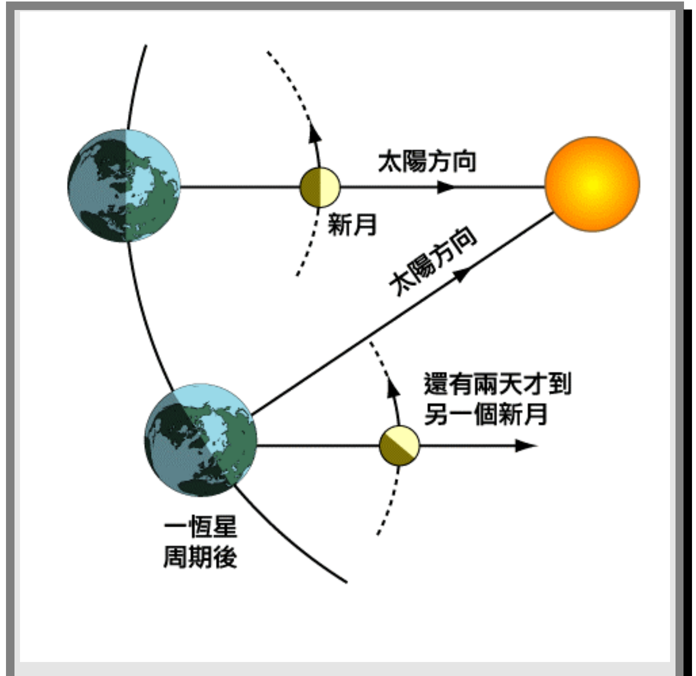


圖 3-5 對地面的觀測者來說，自新月計起一個恆星周期後，月球已回到它出發時在天球上的位置，但其間地球繞太陽轉動，故太陽已離開了它最初在天球上的位置。因此月球需要多走約兩天方能趕上太陽而成為另一個新月。

3.3 潮汐(Tides)

- 月球作用在地球的引力很弱 (約為地球引力的 0.0003 %)。
- 萬有引力與距離的平方成反比 (即距離*越遠*，引力*越弱*)。
- 地球面對月球的一面所受到的引力最強，其次是地心，最弱的是背向月球的一面(圖 3-6)
  - 相對於地心而言，引力的相差使地球前、後部的海水沿月球方向同時背向地心漲起
  - 地球每日自轉一周，故每日地球上每一地點都會經過漲起的海水區域兩次
  - 理論上地球表面同一地點每天會發生兩次潮漲 (high tide)，兩次潮退 (low tide) (實際情況會因個別地理環境而變得更複雜)
- 太陽也會產生類似的潮汐現象。太陽的質量雖然遠比月球大，但距離很遠，故潮汐力大約只有月球的一半。

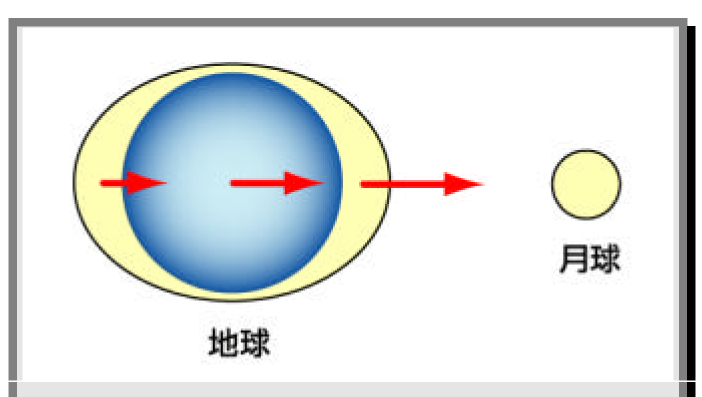


圖 3-6 由於地球各部份與月球的距離不一樣，所以月球作用在地球各部份的引力大小不同。相對於地心而言，引力的相差使地球前、後部份的海水沿月球方向背向地心漲起 (此圖大大誇張了水位的高度)。

- 朔望潮 (Spring tide)：在新月與滿月時，太陽與月球的潮汐力在同一方向，故作用在海水的潮汐力最大，潮汐最強 (圖 3-7)。
- 弦潮 (Neap tides)：在上弦月與下弦月時，太陽與月球的潮汐力互相垂直，部份潮汐力抵銷，潮汐最弱
- 地球自轉帶動海水與海床互相摩擦
  - 摩擦力使地球自轉變慢
  - 地球的自轉週期每世紀增加 0.001 秒
  - 海洋生物化石證實四億年前地球每日只有 22 小時
- 地球作用在月球的萬有引力也產生潮汐效應
  - 岩石間的摩擦力減慢月球的自轉速度
  - 潮汐耦合 (Tidal coupling)：月球的自轉週期 (self-rotation period) 緩慢地增加著，直至與公轉週期 (orbital period) 相同
  - 結果月球永遠以同一面向著地球
- 地球自轉，摩擦力使脹起的海水略為偏離地球和月球的連線 (圖 3-8)
  - 地球上脹起的海水對月球產生引力
  - 月球在軌道上被加速，與地球的距離緩慢地增加 (每年 3 cm)

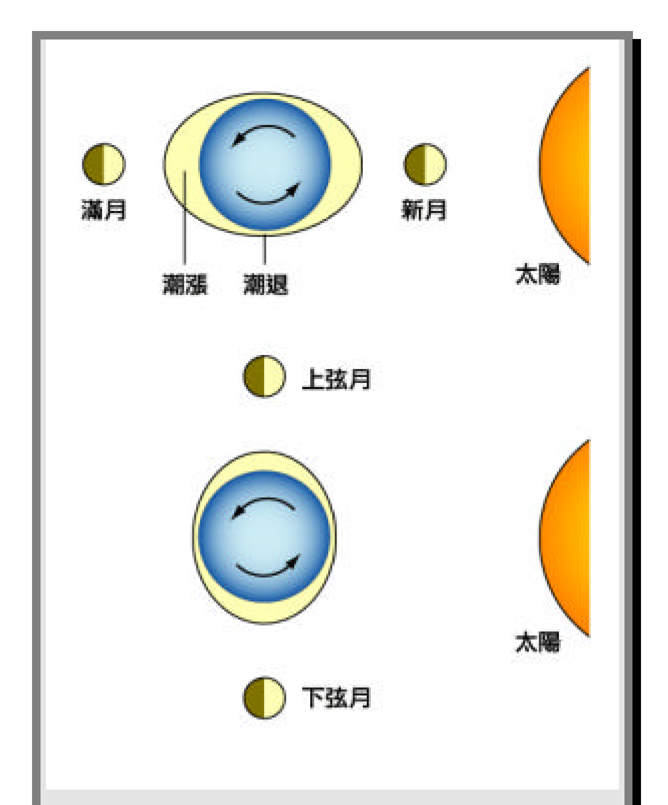


圖 3-7 在新月與滿月時 (上)，太陽和月球所產生的潮汐力在同一方向相加，導致更大的潮漲(朔望潮)。在上弦月與下弦月時 (下)，太陽與月球所產生的潮汐力互相垂直，部份潮汐力互相抵銷，故潮汐較弱 (弦潮)。

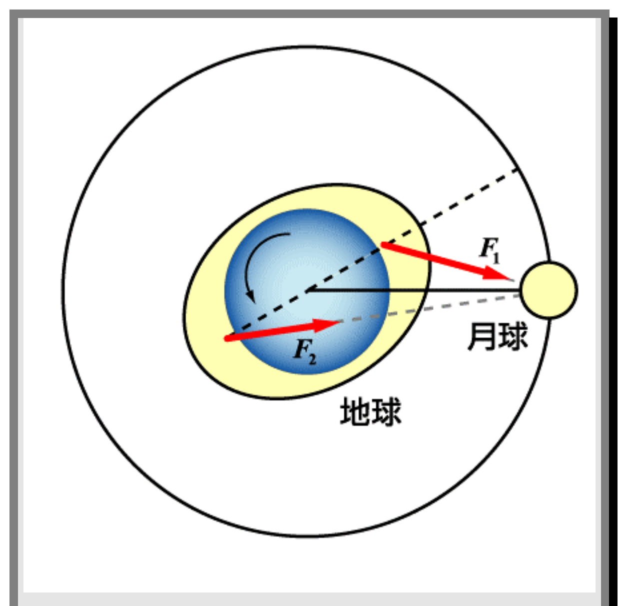


圖 3-8 地球自轉使脹起的海水略為偏離地球和月球的連線。脹起的海水與月球互相吸引。圖中的 $F_1 > F_2$，因此月球在軌道上被「向前拉」，速度增加，漸漸離開地球。

3.4 月食與日食 (Eclipses)

- **月球軌道 (環繞地球公轉) 與地球 (環繞太陽公轉) 的軌道相交於兩個交線 (Line of nodes) 之上。**
- **當太陽和月球*兩者*同時迫近交線，太陽、地球和月球就會幾乎排列在一直線上，發生月食和日食** (圖 3-9)
- **食季 (Eclipse season)：在一年中某些日子內，太陽與交點的距離較近，足以產生月食或日食。**
- **影子的結構** (圖 3-10)
  - **陰影可以分為兩部份**
  - **本影 (Umbra)：光線完全不能照到的區域，即光線完全被物體遮擋著，是完全黑暗的區域**
  - **半影 (Penumbra)：部份光線被物體遮擋著的區域，並非全黑，只是較陰暗區域**

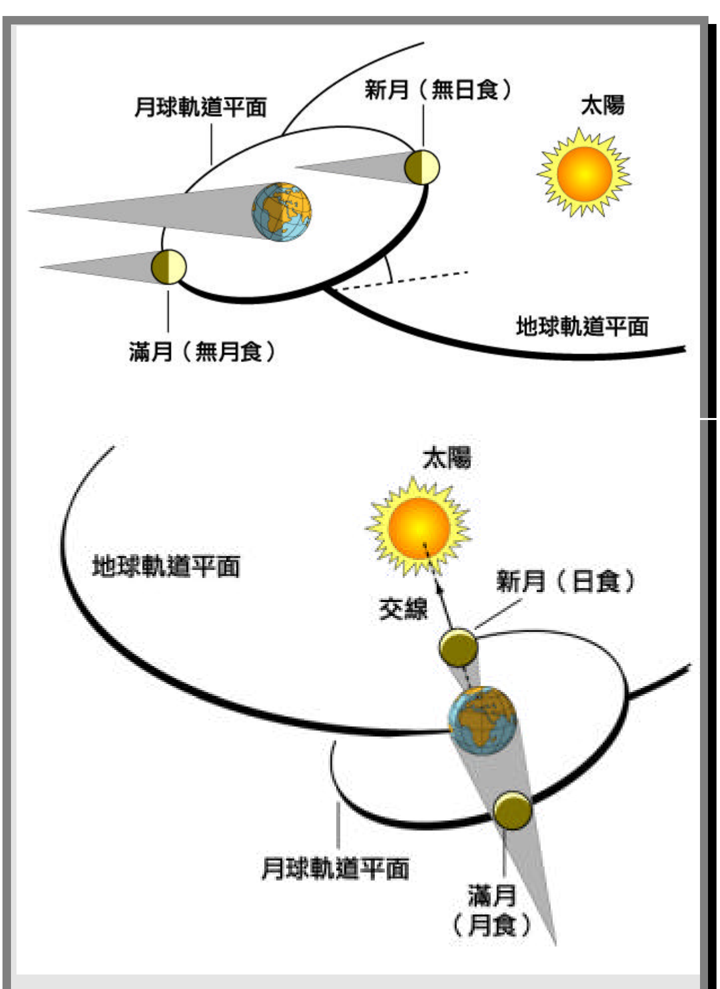


圖 3-9 地球與月球的公轉軌道互相傾斜 5°。月球軌道與地球軌道相交於一直線上，稱為交線。在新月和滿月時，若交線不是指向太陽 (上圖)，地球或月球的影子便不能落在對方上，日月食也就不能發生。但若交線指向太陽，日月食就可能在新月和滿月時發生 (下圖)。

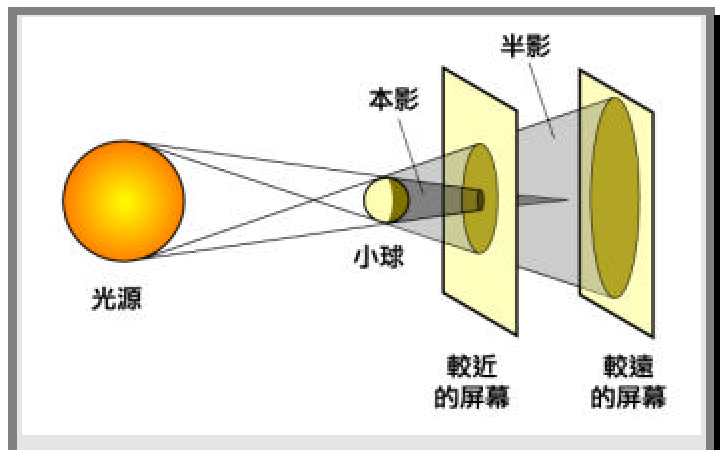


圖 3-10 大頭釘 (地球或月球) 的影子。本影是全黑的圓錐形區域；半影是散發在本影周圍範圍較大、部份光線可以照射到的區域。

- **月食 (Lunar eclipse)：月球走入地球的影子內** (圖 3-11)。
- **月全食 (Total lunar eclipse)：月球完全沒入地球的本影區域，沒有陽光可*直接*到達月面**
  - **只有被地球大氣層折射的陽光方能到達月球。藍光被大氣層的粒子散射的程度比紅光大。故大部份藍光都給散射開了，只有紅光才給落在月面上，因此月面並非全黑，而是暗紅色的**
  - **月偏食 (Partial lunar eclipse)：只有部份月面沒入地球之本影區域，即只有部份月面給陽光照亮，月面缺了一口。**
  - **半影月食 (Penumbral eclipse)：月球只沒入地球之半影區域，月面仍是全部被陽光照亮，但顯得比平時暗些**

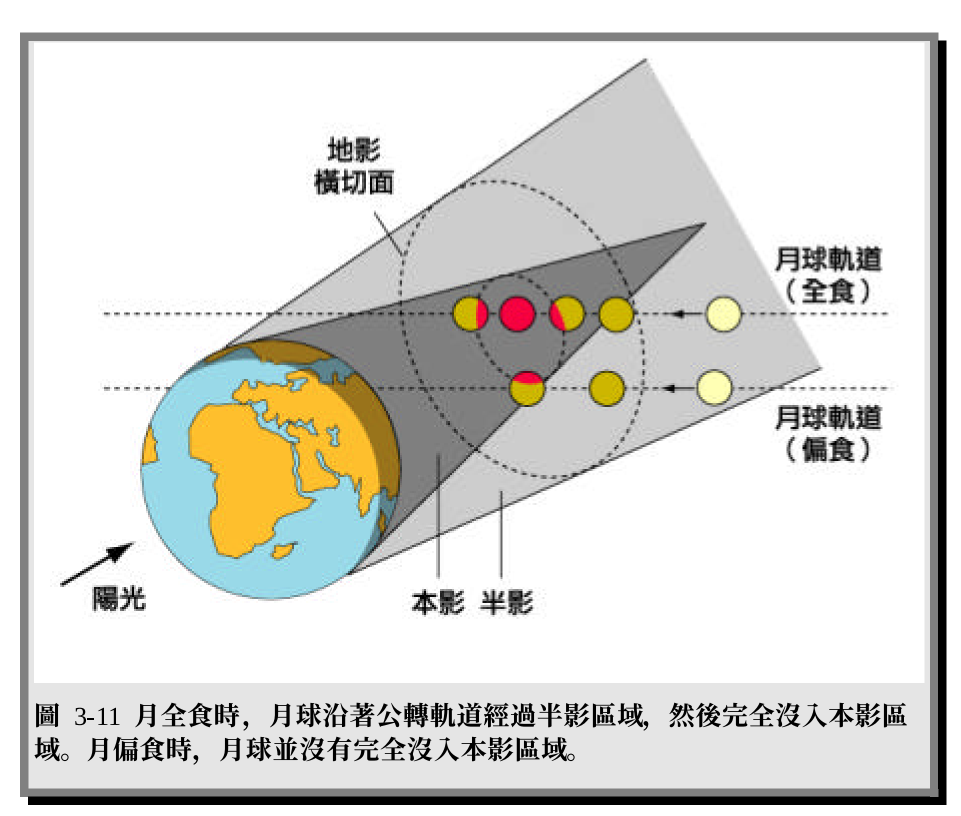


圖 3-11 月全食時，月球沿著公轉軌道經過半影區域，然後完全沒入本影區域。月偏食時，月球並沒有完全沒入本影區域。



圖 3-12 月全食時，月球沿著公轉軌道經過半影區域，然後完全沒入本影區域。月偏食時，月球並沒有完全沒入本影區域。

- 日食 (solar eclipse)：月球的影子落在地球上 (圖 3-13)。
  - 地球自轉和月球的運動使月球的本影在地面掠過，形成一條日全食帶，在裏面的觀測者可見日全食 (Total solar eclipse)
  - 月球投在地球上的本影直徑約為 270 km，遠比地球為小 (地球的直徑約為 13,000 km) 。因此，月球的本影很快掠過某一地點，在地球上某處觀測，日全食只能維持數分鐘
  - 在月球半影內的觀測者可見日偏食 (Partial solar eclipse)。

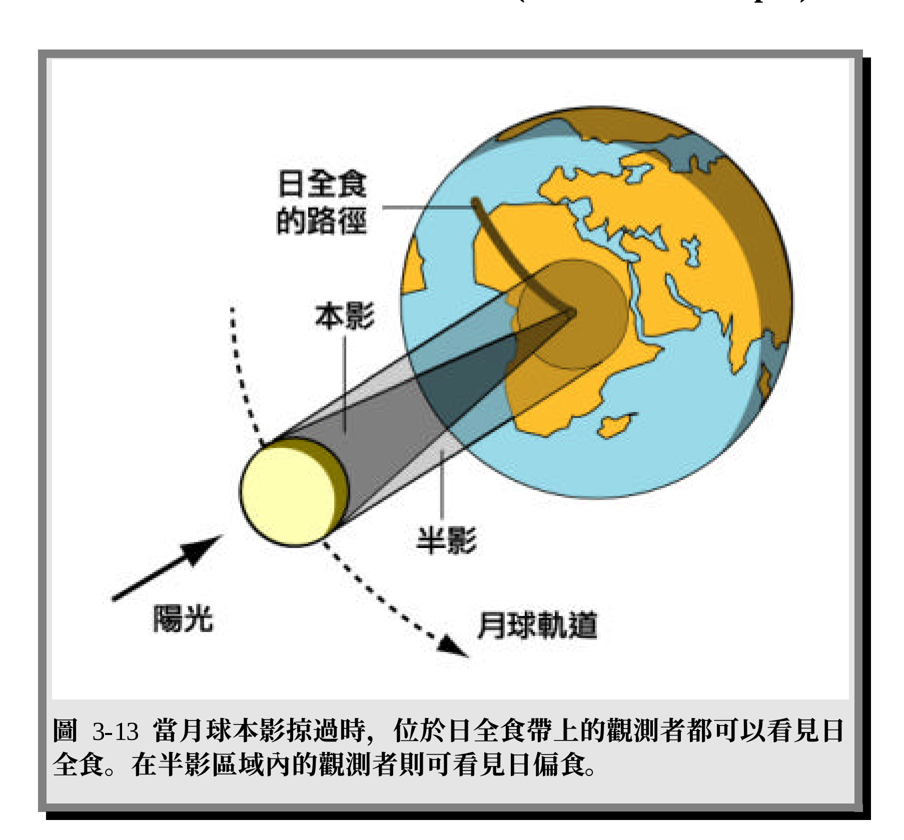


圖 3-13 當月球本影掠過時，位於日全食帶上的觀測者都可以看見日全食。在半影區域內的觀測者則可看見日偏食。



圖 3-14 日全食。



圖 3-15 日環食。

- 日環食 (Annular eclipse)：月球距離地球較遠時不能夠完全遮蔽太陽 (圖 3-16)
  - 全食帶只沒入月球的半影區內，不能進入月球的本影區內
  - 太陽的中央部份給月球遮蔽，只露出光亮的邊緣，形成環狀，故名

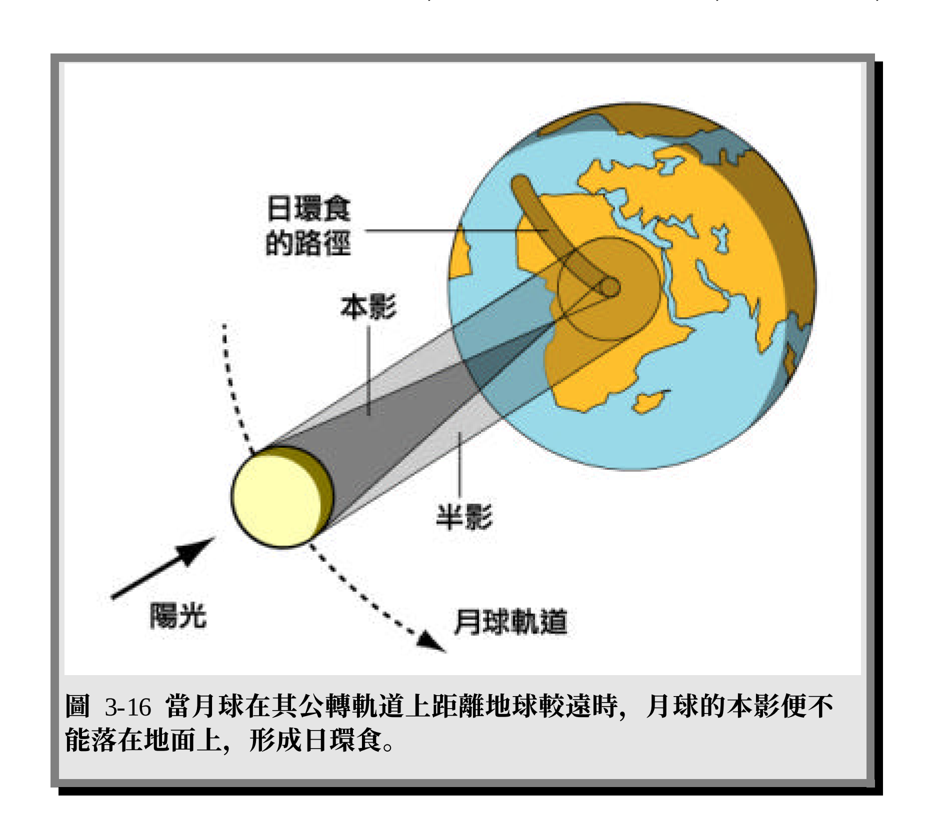


圖 3-16 當月球在其公轉軌道上距離地球較遠時，月球的本影便不能落在地面上，形成日環食。

- 沙羅週期 (Saros cycle)：太陽、地球和月球每隔 18 年 13.3 日就會回到相同的*相對*位置上

  ⇒ 重複發生日食和月食 (但在不同的地理位置發生)